

전기자동차 전력 시스템의 모델링 및 시뮬레이션

이 계문°, 조 보형
서울대학교 공과대학 전기공학부

Modeling and Simulation of Electrical Power System of Electric Vehicle

Jea-moon Lee°, Bo-Hyung Cho
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - Electrical Power System (EPS) of Electric Vehicle which consists of batteries, motor and driving subsystem, has been modeled. A battery model is modeled with an electrical circuit representing a characteristics of real battery. Driving subsystem is modeled as three different level namely exact, average and functional models. Load profile includes road information, speed profile and EV mechanical parameters, which are incorporated into a reference torque in the driving subsystem model. A system model is integrated to simulate the performance of electric vehicle such as energy balance, battery status, and electrical stress of each subsystem.

1. 서론

환경문제가 대두되고 있는 시점에서 도시에서의 대기오염의 주요 요인은 자동차의 배기가스이다. 또한 캘리포니아 법안[1]에 의해 자동차 회사들이 무공해자동차 개발에 힘써왔다. 무공해자동차 중에서 전기자동차가 가장 가능성과 실현성이 높다. 실제 전기자동차 개발을 위하여 컴퓨터를 이용한 전체 전력시스템 개발과 모의 실험을 할 수 있는 software testbed 시스템의 개발이 매우 중요하다. 전기적 측면에서 전기자동차의 구성시스템을 보면 크게 네가지로 나누어질 수 있다. 에너지저장소(축전지부분), 구동시스템 부분(모터와 인버터), auxiliary 부분(파워 핸들, 히터, 전조등 등), 충전시스템부분이다. 각 시스템의 모델을 세우고 그 모델의 정당성을 확인한 후 이 모델들을 연결시켜 시스템 모델을 구현하고 이로부터 주어진 도로조건과 주행상태에서 에너지소모상태를 알아보고 주어진 축전지상태에서 전기자동차의 주행거리를 예상하며 각 subsystem의 전기적 stress를 분석하는 모의실험을 하였다.

2. 각 구성요소 및 subsystem 모델

A. 축전지 모델 (Battery Model)

축전지는 회로모델을 이용하였다.[2] 이 모델은 축전지의 비선형적인 특성과 주어진 충전 및 방전 데이터에 의해 회로모델 파라미터를 결정할 수 있으며 회로모델이므로 전력 시스템 모델을 구현하는데 유리하다. 축전지의 특성은 단자전압과 용량의 관계곡선에서 충전시와 방전시가 다르다. 방전곡선에서도 방전전류에 따라 단자전압과 용량

(Ah)이 달라진다. 또한 내부온도와 압력에 따라 축전지용량과 단자전압이 달라진다. 내부저항도 축전지의 방전된 양에 따라 변하나 여기서는 모델하지 않았다. 예로써 Ni-Cd 축전지 모델을 소개하겠다. 회로모델은 그림 1과 같다. R1은 축전지 내부저항, D1은 전지의 히스테리시스 효과, D2는 비선형 내부저항 효과, D3는 전하 누설과 과충전 도전 누설, C1은 선형 저장 커패시턴스, C2는 화학 반작용 저장 효과 커패시턴스를 나타내며 capacitance의 값은 C1으로 흐르는 전류에 따른 전압에 관계되어 전류의 양에 따라 용량이 변하는 아래와 같은 비선형 관계식을 가진다.

$$I_1 = 2K_1 \sinh(K_3 V_1) \tag{1}$$

$$C_1 = A \exp(-B(V_{oc1} - V_M)^2) + D \tag{2}$$

$$K_1 = \frac{I_o \exp(40.27 K_2 (1 - \frac{519}{T + 459}))}{\exp(40.27 \frac{V_o}{L}) - 1}, K_3 = \frac{20900}{L(T + 459)}$$

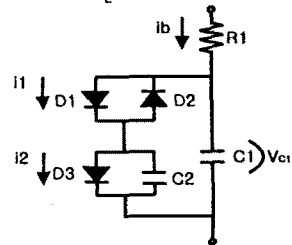


그림 1 축전지 회로모델

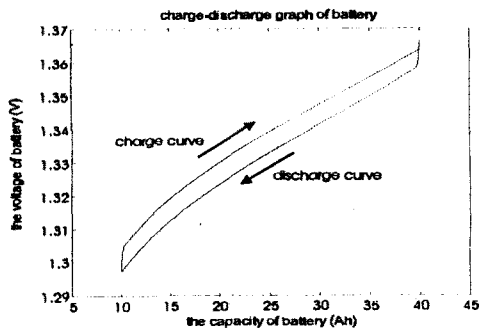
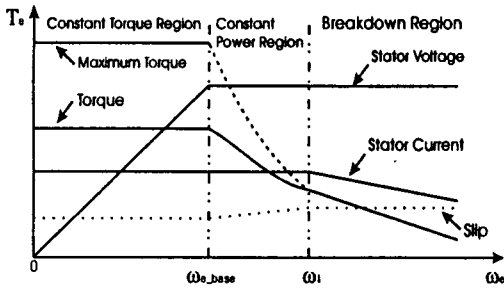


그림 2 축전지의 충전방전 곡선

주어진 Ni-Cd 축전지 충방전 데이터를 이용하여 C_1, C_2, R_1 을 Zimmerman 과 Peterson 논문의 방정식으로 부터 구한다[3]. 그림_2 는 그림_1 의 축전지 모델을 사용한 충방전 곡선이다.

B. Driving system model

구동시스템은 모터와 인버터로 구성되어 있고 구동시스템 모델은 입력은 기준토크(엑셀 및 브레이크 신호)와 인버터 dc link 직류전압이고 출력은 dc link 직류전류와 자동차의 속도이다. 구동시스템 모델은 알고자 하는 정보의 종류에 따라 3 종류의 모델 즉 exact model, average model, functional model 이다. 구동시스템에 대해 설명하면 다음과 같다. 유도전동기는 시변계수가 없게 d-q 동기좌표계 회로 모델을 이용하였다. 유도전동기는 토크-속도 특성에 의해 세가지 영역(정토크 영역, 정파워 영역, breakdown 영역)으로 나누어지고 그림_3 에 나타났다. 약계자 영역, 즉 정파워 영역과 breakdown 영역 운전을 위한 제어방식으로 고전적인 $1/\omega_s$ 방식을 모델하였다.



그림_3 유도전동기 특성곡선

전류 제어기는 일반적인 벡터제어를 사용한 비간섭 PI 전류제어 방법을 모델하였다. 과변조시 대책은 기준전압 V_{qss} 와 V_{dss} 가 최대 고정자전압 V_{max} 보다 큰 경우인데, 여기서는 간단히 V_{qss} 와 V_{dss} 의 크기를 비례적으로 줄이는 방법으로 구현하였다.

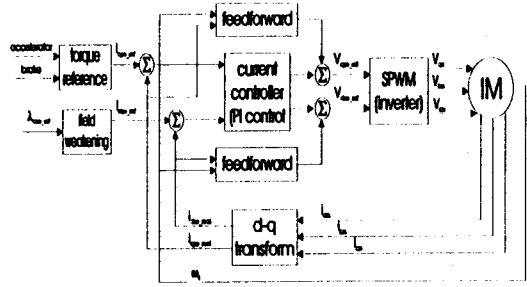
B1. Exact model

PWM 스위칭 방법은 여러가지가 있으나 여기서는 SPWM 스위칭방법을 모델하였다. SPWM 인 경우 선형적으로 얻을 수 있는 최대 고정자전압은 $V_{dc}/2$ 가 되고 전압 제한은 $V_{ds}^e*2 + V_{qs}^e*2 \leq V_{s_max}^2$ 이 된다. 출력 토크와 dc 전류 i_{dc} 는 다음식으로 구해진다.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{Pole}{2} \cdot L_m (i_{qss}^e i_{drs} - i_{dss}^e i_{qrs}) \quad (3)$$

$$i_{dc} = (i_a S_a + i_b S_b + i_c S_c) \quad (4)$$

그림_4 는 대략적인 블럭다이어그램이다



그림_4 Exact model

B2. Average model

Exact model 이 인버터 소자에 걸리는 전류 전압의 실제 파형등 자세한 정보를 모의실험할 수 있는 반면, 긴시간을 요구하는 다이내믹 모의실험에는 모의실험 시간이 너무 오래 걸려 적합하지 않다. Average model 은 이러한 경우를 위하여 고주파 스위칭 함수를 주기로 평균한 것이며 기본 다이내믹 특성을 모의실험할 수 있는 모델이다. 스위칭 함수 S_a, S_b, S_c 를 푸리에 급수의 기본파로 표현하면

$$S_a^* = \frac{V^*}{V_{dc}} \cdot \sin(\theta_s), \quad (5)$$

$$S_b^* = \frac{V^*}{V_{dc}} \cdot \sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}), \quad (6)$$

$$S_c^* = \frac{V^*}{V_{dc}} \cdot \sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \quad (7)$$

로 표현할 수 있다. 이때

$$V_{an} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot \frac{V^*}{V_{dc}} \{2 \sin(\theta_s) - 2 \sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) - 2 \sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3})\}$$

$$= V^* \sin(\theta_s) = V_{an}^* \quad (8)$$

$$V_{bn} = V^* \sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) = V_{bn}^* \quad (9)$$

$$V_{cn} = V^* \sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) = V_{cn}^* \quad (10)$$

$V_{an} = V_{an}^*, V_{bn} = V_{bn}^*, V_{cn} = V_{cn}^*$ 이 된다. 출력토크와 dc link 직류전류는 다음 식에서 구해진다.

$$T_e = 3/2 \cdot Pole/2 \cdot L_m \cdot (i_{qss}^e i_{drs} - i_{dss}^e i_{qrs}) \quad (11)$$

$$P = 3/2 \cdot (V_{qss}^e i_{qrs} + V_{dss}^e i_{dss}) \quad (12)$$

$$i_{dc} = P/V_{dc} \quad (13)$$

B3. Functional model

에너지 평형, 즉 축전지의 충방전 status 와 load profile 의모의실험등 긴 time constant 가 포함하는 long term 시뮬레이션을 할때 구동 subsystem 이 정상적으로 작동한다는 가정하에 구동 subsystem 을 수학적 기능식으로 표현한 것이다. 액셀러레이터 신호와 브레이크신호는 모터의 기준토크로 환산되고 기준토크 T_e^* 는 V_{dc} 와 모터 속도-토크 특성에 따라 제한된다. V_{dc} 에 의한 T_e^* 제한은 stationary circuit model 에서 얻을 수 있다. (V_s : 입력전압, s: 슬립, R_s : 고정자저항, R_r : 회전자저항, V_{dc} : dc link 전압, Pole: pole 수)

$$T_e = \frac{3 Pole \cdot X_m^2 \cdot V_s^2 \cdot R_r}{2 V_{dc} \cdot Y} \quad (14)$$

$$Y = \frac{S}{(A+BS)^2 + (C+DS)^2}$$

$$A = R_s R_r, B = -(X_{ls} X_{lr} + X_{ls} X_m + X_{lr} X_m)$$

$$C = R_r X_{lr} + R_r X_m, D = X_{lr} R_r + X_m R_s$$

정격 slip, 정격속도일 때, T_e^* 는 T_{e_rate} 로 제한된다. 기준토크 T_e^* 는 속도-토크 특성곡선에 의해 다음과 같이 제한된다[4].

$$\omega_e \leq \omega_{base} \text{ 이면 } T_{e_out} = T_e^* \leq T_{e_rate} \text{ 이고}$$

$$\omega_e \geq \omega_{base} \text{ 이면 } T_e^* \leq T_{e_out} \omega_{base} / \omega_e \text{ 이고}$$

$$\omega_e \geq \omega_1 \text{ 이면 } T_{e_out} = T_e^* \leq T_{e_rate} \cdot \omega_1 \omega_{base} / \omega_e^2 \text{ 가 된다.}$$

전체파워는 기계적 출력파워(식_15)와 철손을 무시한 동손만의 손실파워(식_16)의 합이고 이때 I_{dc} 는 식 (18)이다.

$$P_m = T_{e_out} \cdot \omega_m \quad (15)$$

$$P_{loss} = 3/2 \cdot \{r_s (i_{qs}^2 + i_{ds}^2) + r_r (i_{dr}^2 + i_{qr}^2)\} \quad (16)$$

$$P_{total} = P_m + P_{loss} \quad (17)$$

$$I_{dc} = P_{total} / V_{dc} \quad (18)$$

모터의 출력토크와 속도와의 관계는 다음과 같다.

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = (T_e - T_L) \times \frac{\eta}{R} \quad (\eta: \text{축 효율 } I_R: \text{기어비}) \quad (19)$$

T_L (식_25)은 주행에서 생기는 총주행저항 토크이다. 총주행저항(식_24)은 관성저항(식_20), 공기저항(식_21), 등판저항(식_22), 구름저항(식_23)으로 이루어졌다.

$$R_a = a / g \cdot (W + \delta W) \quad (20)$$

$$R_f = \mu_f A v^2 \quad (21)$$

$$R_s = W \sin \theta \quad (22)$$

$$R_r = \mu_r W \cos \theta \quad (23)$$

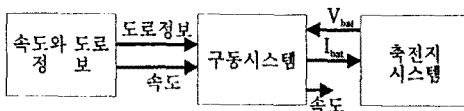
$$R_{total} = R_a + R_f + R_s + R_r \quad (24)$$

$$T_L = R_{total} \cdot \frac{D}{2r_t} \cdot g \cdot I_R \quad (25)$$

(W : 자동차무게 (kg), δW : 회전부분 가속에 의한 무게, A : 차의 정면면적 (m^2), μ_f : 자동차 공기저항 계수, v : 자동차의 속도 (km/h), μ_r : 지면마찰 계수, D : 자동차지름(m), I_R : 기어비, η_t : 축 효율, g : 중력가속도)
브레이크 모델은 복잡하고 일반적인 모델을 세우기에 표준이 없기 때문에 단순하게 전기적으로 모터 역토크와 나머지 부분을 기계적 브레이크로 모델하였다. 역토크 발생시 회생에너지를 축전지에 저장할 수 있다.

3. 전체시스템 모델 및 시뮬레이션

전기자동차의 에너지소모는 주로 주행 중에 일어나므로 auxiliary system 중 히터나 dc-dc converter 등의 모델을 포함하지 않고 전체시스템을 구동시스템, 축전지시스템, 속도와 도로정보로 그림_5과 같이 구성하였다. 이와 같은 시스템을 가지고 정속도 시 에너지소비와 주행거리를 알아볼 수 있고 주어진 도로정보와 주행속도에서 에너지소모와 축전지, 모터등의 상태를 알 수 있다.

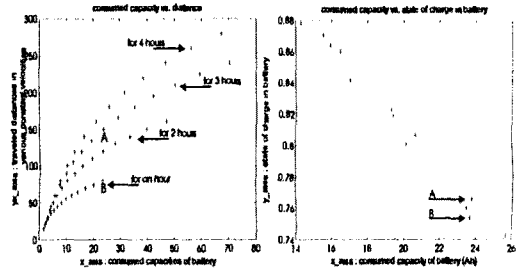


그림_5 전기자동차 전체시스템

Mechanical parameter of EV[5] 를 다음과 같이 놓고 시뮬레이션하였다.

EV 전체무게=1583 kg, Battery 무게=470 kg, 용량=80 Ah, 단자전압=312 V, 모터: 3 상유도전동기 50 마력, 기어비=5.5 : 1, 타이어 반지름=299 mm, 공기저항계수= 0.34, 구름저항계수=0.0044, 정면면적=2.14 m^2

첫번째, 평지에서 여러 정속도로 모의실험을 행하였다. 그 결과를 그림_6에 나타내었다. 그림_6은 정속 15km/h 부터 80km/h 까지 5km/h 간격으로 각각 1, 2, 3, 4 시간동안 주행한 거리와 소비한 에너지용량에 대한 그래프이다. 예로 80km/h 한시간 운전시(B) 약 23 Ah를 소비하였으나 50km/h 세시간 운전시(A) 약 23 Ah를 소비하였다.

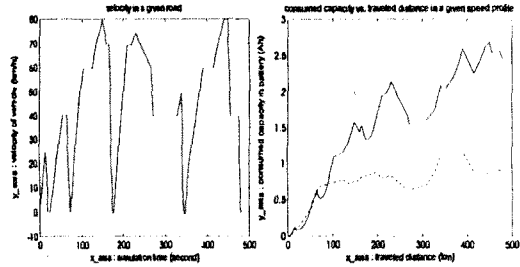


그림_6

그림_7

축전지 모델에서 설명하였듯이 같은 Ah라도 소모하는 전류량(파워 즉 속도)에 따라 축전지의 충전상태가 틀리게 된다. 그림_7에 나타내었다.

다음은 주어진 도로조건과 주행속도에 대해 시뮬레이션을 행하였다. 그림_8는 전기자동차의 주행속도이다. 그림_9는 주행거리와 소비한 에너지를 보이고 있다. 가속중(엑셀러레이터시)에는 에너지를 소비하고 감속중(브레이크시)에는 에너지를 저장한다.



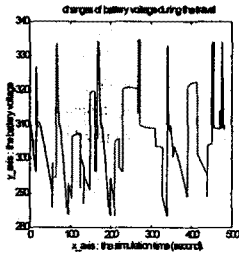
그림_8

그림_9

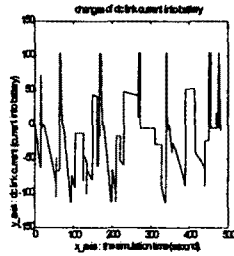
실제 speed profile

--- constant speed

그림_10과 그림_11은 축전지의 단자전압과 입력전류를 나타내고 있다. 축전지의 내부저항의 영향으로 입력전류에 따라 단자전압이 크게 변한다. 단자전압의 변화는 또한 인버터의 입력전압의 변화를 의미한다. 축전지에 걸리 대략적인 stress를 볼 수 있다.



그림_10



그림_11

4. 결론

전기자동차의 전기적 시스템의 모델을 통해서 주어진 load 즉 road profile, speed profile, mechanical parameter 등에서 주행할 때 소비되는 에너지를 예측할 수 있고 주어진 축전지 용량에 따라 주어진 도로정보나 주행속도에서 예상되는 주행거리를 얻을 수 있다. 주행중 축전지전압이 변동된다는 사실로부터 전기자동차 subsystem의 전원공급 장치 설계에 도움이 될 것이다.

참고 문헌

- [1] C.C. Chan, "An Overview of Electric Vehicle Technology," IEEE 1993 Proceedings, Vol. 81, No. 9, Sep pp.1201-1213.
- [2] Zvi Gur, Xuesi Mang, Ashok R. Patil, Dan M. Sable, Bo H. Cho, and Fred C. Lee, "Design of a Nickel-Hydrogen Battery Simulator for the NASA EOS Testbed,".
- [3] H.G. Zimmerman, R.G. Peterson, " An Electrochemical Cell Equivalent Circuit for Storage Battery Power System Calculations by Digital Computer," IECEC 1970 Proceedings, Vol 6, pp. 6.33-6.39.
- [4] 김 상훈, " 약계자 영역에서 유도전동기의 최대 토크 운전," 서울대학교 대학원 전기공학과 공학 박사학위 논문, 1994년 8월
- [5] C.C.Chan, Yi-ju Zhan, Lon Bell, Zhi-an Yu, Yun-ichi Araki, "the Development of Advanced Electric Vehicle "U2001"," Electric Vehicle Symposium Proceedings, Vol. 1, pp.282-291, 1994